

**This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

**Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.**

**Defects in the images may include (but are not limited to):**

- **BLACK BORDERS**
- **TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- **FADED TEXT**
- **ILLEGIBLE TEXT**
- **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- **COLORED PHOTOS**
- **BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS**
- **GRAY SCALE DOCUMENTS**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nl ungsschrift  
⑩ DE 196 12 613 A 1

⑤ Int. Cl.<sup>8</sup>:  
G 01 R 19/00  
H 01 F 6/00

⑳ Aktenzeichen: 196 12 613.4  
㉔ Anmeldetag: 29. 3. 96  
㉕ Offenlegungstag: 2. 10. 97

DE 196 12 613 A 1

⑦ Anmelder:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 76133  
Karlsruhe, DE

⑦ Erfinder:

Ullmann, Bernd, Dr., 76133 Karlsruhe, DE

⑤ Entgegenhaltungen:

US 51 34 360  
Polák, M. et al. »Self-field Effect and  
Current-Voltage Characteristics of A.C.  
Superconductors«. In: Cryogenics 1994, Vol. 34,  
No. 4, S. 315-324;  
Zhu, W. et al. »Application of Static Electric  
Potential Measurements in Detecting Defects in  
BT-2223 Wire«. In: Proc. to MRS, Boston/USA 1995,  
S. 236;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤ Verfahren zur Bestimmung des kritischen Stromes  $I_c$  von Supraleitern und Meßeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens

⑤ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung des örtlichen kritischen Stromes in einem Supraleiter und eine Meßeinrichtung. Hiermit können auf einfache und zuverlässige Art und Weise Supraleiter in Form von Halbzeugen, Kabel, Kompositen und Einkern- sowie Mehrkernsupraleiter in wirtschaftlicher Weise hinsichtlich ihrer Qualität erfaßt werden. Insbesondere Supraleiter mit hoher Sprungtemperatur  $T_c$  können mit geringem technischen Aufwand zügig vermessen werden.

DE 196 12 613 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des kritischen Stromes  $I_c$  in Supraleitern (magnetfeldbedingte, orts aufgelöste Bestimmung der kritischen Stromdichte MOBS). Insbesondere dient das Verfahren zur Vermessung von supraleitenden Halbzeugen, Mehrkernsupraleitern, supraleitenden Kabeln oder einem Supraleiterkomposit mit z. B. helikal aufgebrachten oder kabeltechnisch sinnvoll gewickelten Supraleiterfilamenten auf einem Kunststoff-Rohr oder -Zylinder.

Der kritische Strom  $I_c$  eines Supraleiters schwankt entlang des Leiters überwiegend auf Grund des anisotropen Aufbaus des Supraleiters oder der Supraleiterfilamente. Für den gesamten Leiter ist hinsichtlich der Stromtragfähigkeit — analog dem schwächsten Glied einer Kette — die geringste maßgebend. Daher ist die Ermittlung des kritischen Stromes  $I_c$  bzw. seine Schwankung über der Leiterlänge für die qualitative Beurteilung des Leiters wesentlich, bzw. können nach einer solchen Messung Leiterbereiche, die nur einen kritischen Strom  $I_c$  unterhalb einer vorgesehenen Schranke führen können, herausgetrennt werden.

M. Polak et al. beschreibt in Cryogenics, 34, 805 (1994), wie über den Halleffekt die Magnetisierung an Supraleitern gemessen wird. Hierbei sind gewisse Schwierigkeiten zu überwinden. Die einzelnen supraleitenden Filamente eines technisch relevanten Mehrkernleiters müssen während der Messung elektrisch gekoppelt sein. Die Kopplung ist u. a. von der Variation der Abstände der Einzeileiter und deren Querschnittsfläche abhängig. Daraus wird eine starke Variation der Magnetisierung über der Leiterlänge erwartet, die nicht mit dem Strom korrelieren muß.

Stand der Technik ist weiterhin, daß durch Anbringen vieler Spannungskontakte entlang eines nichtisolierten Supraleiters der lokale kritische Strom  $I_c$  ermittelt wird. Das ist eine klassische Methode, die für den Laborbetrieb tolerabel ist, für die industrielle Qualitätskontrolle aber keineswegs praktikabel.

Eine weitere Methode wird von W. Zhu et al. in den Proc. to MRS 95, p 236. Boston, USA vorgeschlagen. Zhu ermittelt über Schleifkontakte den orts aufgelösten kritischen Strom  $I_c$ . Hierzu muß wie bei der klassischen Methode der zu untersuchende Supraleiter elektrisch zugänglich sein, d. h. isolierte Supraleiter können so nicht untersucht werden. Schleifkontakte können allerdings den Supraleiter beim Drüberschleifen beschädigen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein industriell einsetzbares Verfahren und eine Meßeinrichtung zur Ermittlung der Variation des kritischen Stromes  $I_c$  über die Leiterlänge bei isolierten oder nichtisolierten Supraleitern bereitzustellen, mit dem dieser Strom  $I_c$  vollständig erfaßt wird und mit dem auch bei Mehrkernsupraleitern zuverlässige Meßdaten gewonnen werden.

Die Aufgabe wird mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 und einer Meßeinrichtung mit den Merkmalen des Anspruch 5 gelöst.

Mit dem Verfahren kann der Strom  $I_c$  an nichtisolierten und isolierten Supraleitern und insbesondere an Mehrkernsupraleitern einfach und zuverlässig bestimmt werden. Der Spannungsabgriff kann an beliebiger Stelle des zu prüfenden Supraleiters oder auch nur an den beiden Supraleiterenden erfolgen, solange das durchdringende Magnetfeld zwischen den Spannungsabgriffen liegt. Beim isolierten Supraleiter wird die Spannung zweckmäßigerweise an den blankliegenden Stirnseiten

des Supraleiters abgegriffen. Der Strom kann irgendwo im  $I_c$ -Stromkreis gemessen werden (Shunt-Messung z. B.). Beim nichtisolierten Supraleiter kann die Spannung durchaus in der Nähe, vor und hinter dem durchdringenden Magnetfeld abgegriffen werden.

Der Unteranspruch 2 kennzeichnet einen Verfahrensschritt, der für deutliche Meßsignale sehr nützlich ist, nämlich einen  $90^\circ$ -Winkel zwischen der Magnetfeldachse und der Längsachse des Supraleiters.

Anspruch 3 oder 4 kennzeichnen einen Verfahrensschritt mit Hilfe regelungstechnischer Zusatzeinrichtungen zur Spannungs- bzw. Stromkonstanthaltung, mit denen der Strom oder die Spannung einfach erfaßt werden können.

Der in Anspruch 5 gekennzeichnete, prinzipielle Aufbau der Meßeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens muß gewährleisten, daß der zu vermessende Supraleiter bei der Durchdringung durch das Magnetfeld seine Position gegenüber dem Magnetfeld im Abstand und Winkel der magnetischen Achse mit der Leiterlängsachse nicht ändert.

In Anspruch 6 ist eine zweckmäßige Magnetform gekennzeichnet, die zur Erniedrigung des kritischen Stromes für die Messung vorteilhaft ist. Ansprüche 7 und 8 kennzeichnen schließlich die Art des Magneten.

Beim nichtisolierten Einkernsupraleiter ist nach wie vor die Hall-Sonden Meßmethode zweckmäßig, insbesondere wenn der Einkernsupraleiter auf einem Substrat aufgebracht ist und keinen gestreckten Verlauf hat, sondern in zwei Dimensionen planar verläuft. Die Hall-Sonde kann nämlich dann dem Leiter leicht nachgeführt werden.

Supraleiter mit einer Matrixstruktur im Leiterquerschnitt, Mehrkernleiter oder helikal gewickelte Filamente oder sonst in Kabeltechnik gewickelte Filamente auf einem Träger und dergleichen, können mit der Hall-Sonden-Methode nicht vermessen werden. Hingegen ist mit MOBS ein Verfahren gegeben, mit dem nicht nur Rohleiter, sondern auch Halbzeuge und Fertigprodukte zuverlässig zu vermessen sind. Selbst auf Zylinderprofile aufgebrachte Supraleiterfilamente, sog. Supraleiterkomposite, können durch Drehen des Leiters im durchdringenden Magnetfeld vermessen werden.

Die Vermessung des Supraleiters ohne Magnetfeldbeeinflussung, also  $B = 0$ , kann bei technischen Produkten, bei denen die  $I_c(B)$ -Abhängigkeit bekannt ist — und das ist sie im allgemeinen — entfallen. Allenfalls kann bei einem Stück Supraleiter einer Charge eine solche Messung mit Feld  $B = 0$  zur Überprüfung und Stromnormierung vorgenommen werden.

Die Meßeinrichtung ist besonders einfach bei Hochtemperatursupraleitern einzusetzen, da der kryotechnische Aufwand mit zunehmender Sprungtemperatur zurückgeht und die  $I_c(B)$ -Charakteristik steil ist.

Die Ergebnisse, die mit dem Verfahren und der Meßeinrichtung gewonnen werden, werden im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert werden. Die Zeichnung besteht aus drei Figuren.

Es zeigen:

Fig. 1 den Verlauf des kritischen Stromes  $I_c$  über der Länge des Supraleiters,

Fig. 2 den schematischen Aufbau der Meßeinrichtung und

Fig. 3 eine vergleichende Messung.

Der verwendete Supraleiter 1 ist 25 cm lang, 0,2 mm dick und 3,5 mm breit, er ist ein nichtisolierter Mehrkernsupraleiter. Der kritische Transportstrom  $I_c$  beträgt 2,1 A. Die Meßtemperatur liegt bei  $77^\circ\text{K}$ , also flüssigem

Stickstoff. Das Magnetfeld, das die britische Stromtragfähigkeit schwächt erzeugt ein Permanentmagnet der Maße  $2 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$  oder  $5 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$ . Die Achse des durchdringenden Magnetfelds steht senkrecht auf der Achse Leiterlängsachse des Supraleiters.

Zunächst wird zu Kontrollzwecken der Verlauf des kritischen Stromes  $I_c$  über der Leiterlänge ohne durchdringendes Magnetfeld ( $B = 0$ ) aufgenommen (Fig. 1). Der Stromverlauf schwankt innerhalb eines Bandes, das vom Minimal- und Maximalwert des kritischen Stromes gebildet wird. Danach erfolgt die Messung erneut, jetzt mit der lokalen Durchdringung des Supraleiters durch das extern einwirkende Magnetfeld. Fig. 1 zeigt diesen lokalen Einfluß und die dadurch bewirkte Minderung des kritischen Stromes  $I_c(B)$ . Wesentlich ist, daß das Magnetfeld im Supraleiter so stark ist, daß der neue Verlauf des kritischen Stromes auf jeden Fall unterhalb des Bandes für den kritischen Strom  $I_c(0)$  liegt, dann ist sicher, daß das durchdringende Magnetfeld für die Minderung alleine verantwortlich ist. Die lokale  $I_c$ -Absenkung ist durch den strichpunktierten Verlauf angedeutet. Insgesamt ergibt sich der gestrichelte Verlauf für die Messung nach MOBS.

Zur Veranschaulichung beider Kurven für den kritischen Strom,

$$I_c = f(l); l = \text{Leiterlänge}$$

ist der Supraleiter im Schaubild mit angedeutet.

In Fig. 2 ist die Meßeinrichtung schematisch dargestellt, mit der ein bandförmiger Supraleiter, der auf einer ebenen, zumindest oberflächenisolierten Platte aufliegt und durch zwei Anschläge bzw. Führungen, die eine Führungsrinne bilden, ohne seitliches Hin- und Herbewegen desselben während des Durchziehens vermessen wird. Der Magnet ist in einer vorgesehenen Position in einem Gestell über der Führungsrinne verankert, so daß während des Messens und Durchziehens des Supraleiters die Geometrie Magnetfeld durchdrungenes Supraleiterstück stets unverändert ist. Dadurch ist der B-Feld-behaftete, kritische Strom  $I_c$  alleine auf den Einfluß des durchdringenden Magnetfelds zurückzuführen. Das Magnetfeld im durchdrungenen Supraleitervolumen muß nicht homogen sondern nur stets gleichartig sein.

Je nach Polformung ist bei einem c-förmigen Magneten im Durchdringungsraum ein homogenes Durchdringungsfeld gut annäherbar oder gar erreichbar.

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurde mit der klassischen Methode vieler Potentialabgriffe entlang des Supraleiters vergleichend untersucht. Die Ergebnisse sind in Fig. 3 festgehalten:

Den Verlauf des normierten kritischen Stromes  $I_c/I_{c_{\max}}$  über die Leiterlänge mit der klassischen Methode zeigt die Kurve mit Kreisen. Die Kurve mit Dreiecken ist eine nach dem MOBS-Verfahren bestimmte. Die beiden übrigen Kurven mit Plus- und X-Zeichen geben ebenfalls den normierten kritischen Strom  $I_c/I_{c_{\max}}$  nach dem MOBS-Verfahren wieder, allerdings mit einem kleineren Magneten bzw. einem schwächeren Magnetfeld.

Die Streuung des Stroms  $I_c$  bzw. des normierten Transportstroms  $I_c/I_{c_{\max}}$  im durchgemessenen Leiter ist nach beiden Verfahren gleich. Mit dem MOBS-Verfahren erhält man dementsprechend reproduzierbare Ergebnisse, lokal als auch bei einer erneuten Messung nach mehreren Wochen (Kurve mit Dreiecken). Letztere ist von Interesse, um bei dem vermessenen Hoch-Temperatur-Supraleiter (Bi 2223) eine Degradation

durch Sauerstoff, mechanische Belastung, Abkühlung etc. erfassen zu können.

#### Bezugszeichenliste

- 5 1 Supraleiter
- 2 Magnetfeld
- 3 Leiterlängsachse
- 4 Kontaktstelle, Spannungsabgriff
- 10 5 Achse
- 6 Unterlage
- 7 Führung
- 8 Führungsrinne
- 9 Gestell
- 15 10 Magnet

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung des kritischen Stromes  $I_c$  von Supraleitern (MOBS), bestehend aus den Schritten:

— ein elektrisch nach außen isolierter oder nichtisolierter Supraleiter (1), wie ein Einkernsupraleiter oder ein Mehrkernsupraleiter in Form eines Supraleiterkomposits, Halbzeugs, oder Kabels, wird von einem Magnetfeld (2) örtlich begrenzt durchdrungen, und zwar so, daß die Achse dieses Magnetfelds (2) bzw. seine Ausrichtung zur Leiterlängsachse (3) des Supraleiters (1) während seiner Vermessung unverändert bleibt,

— die Stärke des Feldes B des supraleiterdurchdringenden Magnetfelds (2) wird derart eingestellt, daß der kritische Strom  $I_c(B)$  an jedem Ort l entlang des Supraleiters (1) stets kleiner als der kritische Strom  $I_c(0)$  ohne ein solch durchdringendes Magnetfeld (2) ist, also

$$I_c(B)_{\max} < I_c(0)_{\min}$$

— die Spannung oder der Spannungsabfall wird an zwei Kontaktstellen (4), zwischen denen das Magnetfeld (2) durch den Supraleiter (1) dringt, abgegriffen, und zwar an den beiden Supraleiterenden bei einem isolierten Supraleiter (1) und an zwei beliebigen Kontaktstellen (4) vor und hinter dem durchdringenden Magnetfeld (2) bei einem nichtisolierten Supraleiter,

— die Spannung oder der Spannungsabfall wird bei einem konstanten Strom kontinuierlich über die gesamte Leiterlänge gemessen, oder diskret, d. h. an vorgegebenen Stellen bzw. nach vorgegebenen Längenintervallen des Supraleiters (1) in Abhängigkeit des Stromes gemessen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Achse (5) des supraleiterdurchdringenden Magnetfelds (2) stets so eingestellt wird, daß sie senkrecht zur Leiterlängsachse (3) des Supraleiters (1) steht.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom durch den Supraleiter (1) unter Regelung der Spannung auf einen konstanten Spannungsabfall an beiden Spannungsabgriffen (4) gemessen wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der lokale Spannungsabfall am Su-

praleiter (1) unter Regelung auf einen konstanten Strom durch den Supraleiter (1) gemessen wird.

5. Meßeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens, bestehend aus:

- einer Unterlage (6), die zumindest auf ihrer Oberfläche elektrisch nicht leitend ist, 5
- zwei darauf angebrachten Führungen (7) aus dielektrischem Material, die aufeinander zu- oder voneinander wegbewegt werden können und die feststellbar sind, so daß eine Führungsrinne vorgegebener Breite einstellbar ist, durch die ein zur Vermessung vorgesehener Supraleiter (1) ohne Seitenbewegung gezogen wird, 10
- einem Gestell (9), das mit seiner Unterseite die Führungsrinne (8) überbrückt, indem ein Magnet (10) verankert ist, der in seiner Position bezüglich der Führungsrinne (8) verstellbar ist, so daß die Achse (5) des Magnetfelds (2) den Supraleiter (1) in der Führungsrinne (8) unter einem vorgegebenen Winkel durchdringt und das den Supraleiter (1) durchdringende Magnetfeld (2) im durchdrungenen Supraleitervolumen eine vorgesehene Stärke aufweist. 15 20 25

6. Meßeinrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Magnet (10) eine C-Form hat und die Führungsrinne (8) durch den Luftspalt des Magneten (10) verläuft, so daß eine wenig ausgeprägte Feldinhomogenität im felddurchdrungenen Supraleitervolumen besteht. 30

7. Meßeinrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Magnet (10) ein Permanentmagnet ist.

8. Meßeinrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Magnet (10) ein konventioneller oder supraleitender Elektromagnet ist. 35

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

Fig. 1

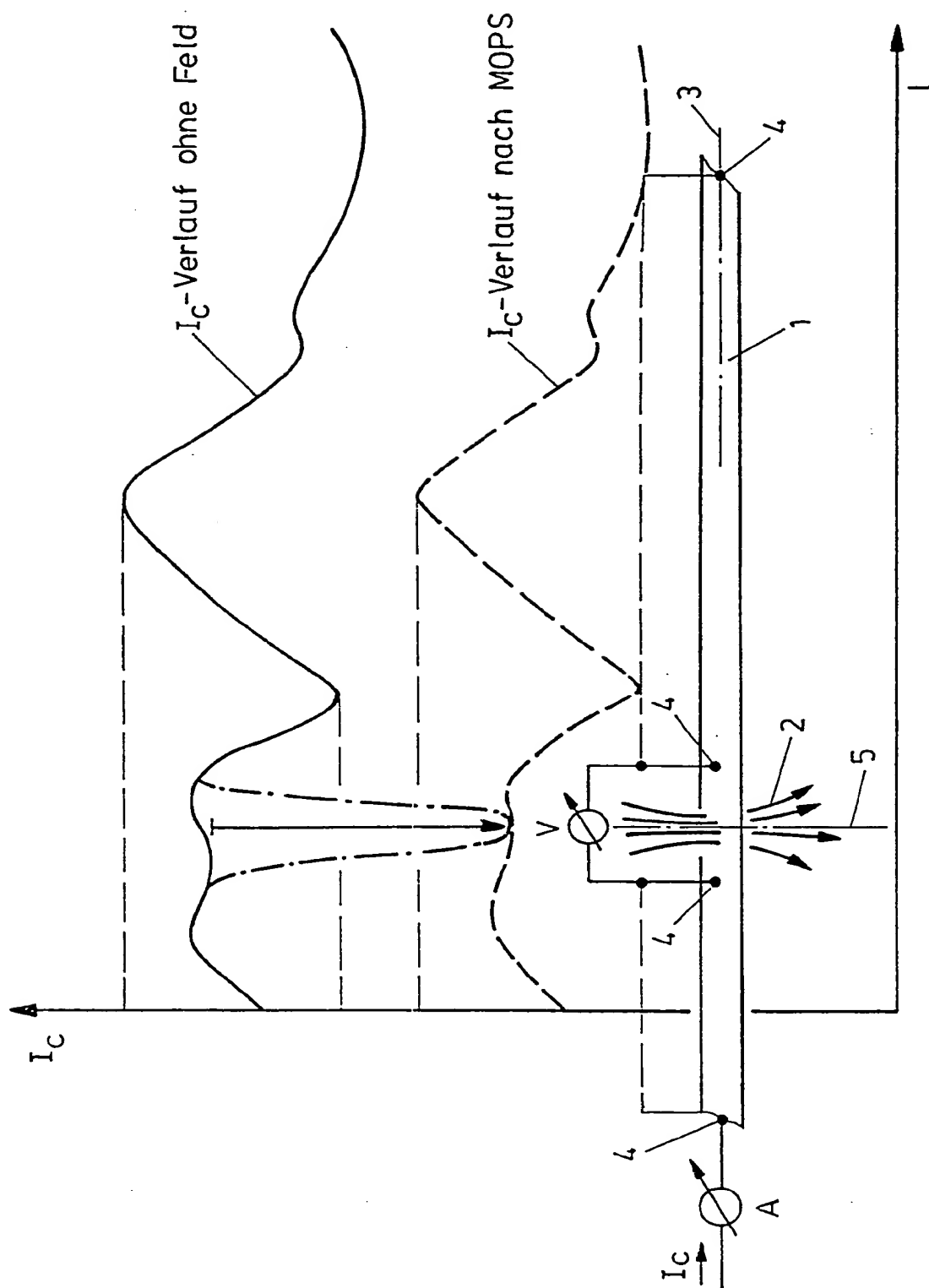




Fig. 2

